

長期定域観測用水中グライダーの水槽実験

浅川 賢一	独立行政法人海洋研究開発機構	海洋工学センター
渡 健介	独立行政法人海洋研究開発機構	海洋工学センター
百留 忠洋	独立行政法人海洋研究開発機構	海洋工学センター
中村 昌彦	九州大学 応用力学研究所	

Towing Tank Tests of an Underwater Glider for Virtual Mooring

Kenichi ASAKAWA	Marine Technology and Engineering Center, JAMSTEC asakawa@jamstec.go.jp
Kensuke WATARI	Marine Technology and Engineering Center, JAMSTEC
Tadahiro HYAKUDOME	Marine Technology and Engineering Center, JAMSTEC
Masahiko NAKAMURA	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Abstract

In order to predict its variation more accurately, ocean environment has been monitored using many kind of methods. However due to the vastness of the ocean, it is hard to acquire enough data even if using all of existing methods. In order to gather enough data within limited resources, we think, key area should be selected where characteristic environmental changes appear in early stages, and long-term and continuous monitoring should be focused on these area. From the above view point, we have proposed an underwater glider for virtual mooring that can conduct a long-term monitoring staying in designated area, and started to develop a prototype. Although a thin string was connected for safety's sake, we have already carried out the first sea test in which the glider submerged to 500 m in depth. In this paper, we report the experimental results of pitching control tests that were carried out in a long towing tank.

1 はじめに

海水の熱容量は大気の約 1,000 倍であり、地球の気温等環境変動の安定化に大きく寄与している。しかし、近年深海の海水温度や塩分にも変化が観測されている。地球環境変動を正確に理解し、予測するためには、海洋の環境変動を長期に渡り連続的に観測することが重要である。

これまで海洋観測はフロートやブイ、観測船、衛星を用いて行われてきた。特に最近では、国際プロジェクトであるアルゴ計画が軌道にのり、全海洋に約 3600 台のアルゴフロート¹⁾が展開され、水深 2000 m までの水温や塩分を準リアルタイムで測定し、データがホームページから全世界に公開されている。観測と観測の間は海中で浮遊しながらスリープすることにより電力の消耗を押さえ、4 年から 5 年の長期観測を実現している。このアルゴフロートは海洋観測にブレークスルーをもたらしたと言われている。しかし、海洋は広大であり、平均すると約 300km 四方に一台しかアルゴフロートが配置されておらず、十分な観測密度が得られていたとは言い難い。しかも、アルゴフロートは海水とともに浮遊するために、観測が重要な地点に留まることができない。

長期的な定点観測はブイシステム^{2),3)}に行われている。しかし、ブイシステムは設置と運用に大型船を要するなどの制約があり、その観測点数を拡大することが難しい。

衛星による観測は、水面近傍に限定される。

このような課題を克服するために、次世代の海洋観測で

は、観測が重要な海域を事前に選択し、長期間に渡り連続的な観測を低コストで行うことが重要である。海水が深海に沈み込み循環を開始する極域周辺域や、エルニーニョ/ラニーニャ現象が生じる赤道近辺はこのような海域の一つである。

一方、最近では水中グライダー⁴⁾が新しい海洋観測の機器として注目されるようになってきた。これらの水中グライダーは主に沿岸の観測に利用されている。水中グライダーは一定海域に留まり観測を行うことはできるが、アルゴフロートの

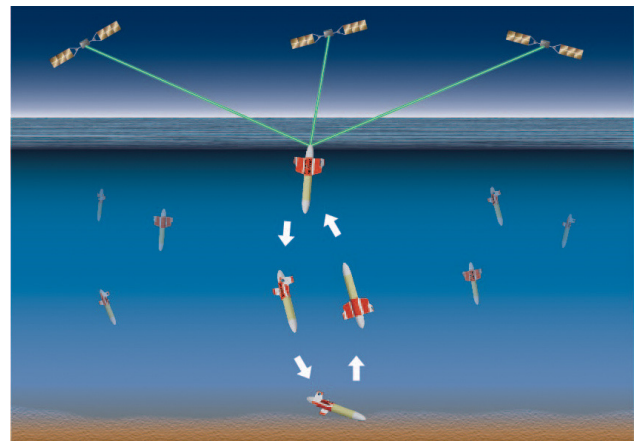


Fig. 1 An operation image of underwater gliders for long-term monitoring

ように数年間に渡る長期間の観測を行うことができない。

筆者らは、このような課題を克服する手段として、水中グライダーにアルゴフロートのようにスリープ機能を持たせることにより、一定の海域において数年間に渡る長期観測を行う長期定域観測用水中グライダーを提案し、プロトタイプの開発を開始した^{5),6)}。提案したグライダーは海底と海面の間を定期的に往復する (Fig. 1)。海底で着底しスリープすることにより、電池の消耗を抑え、長期観測を実現する。海流等で流された場合には、滑走することで目標とする観測海域に復帰する。すでにプロトタイプを製作し、九州大学応用力学研究所所有の深海機器力学実験水槽 (長さ: 65 m, 幅: 5 m, 深さ: 7.5 m) を用いて無制御状態での滑走実験や第 1 回目の海洋実験⁷⁾を実施している。その写真を Fig. 2 に示す。この海洋実験は、防失対策用細径ロープ付きで行った。試作したプロトタイプの最大水深は 3000 m, 空中重量は約 150 kg である。また、1/2 の小型模型を用いて動的流体力係数を求め⁸⁾、無制御状態での滑走状態をシミュレーションし、実験結果と良く一致することを確認している^{9),10)}。

平成 24 年 10 月には深海機器力学実験水槽にてピッチ角を一定に保つ滑走実験を行い、安定した制御が行えることを確認した。制御には PID 制御を用いている。本講演では、この実験方法と実験結果について報告する。なお、シミュレーションとの比較¹¹⁾も行い、良好な結果を得ている。

2 ピッチ角の制御方法

ピッチ角の制御は、重心移動装置 (Fig. 3) に組み込んだ電池を縦方向に動かしてグライダー全体の重心位置を変えることにより行っている。この重心移動装置は、電池を回転するこ

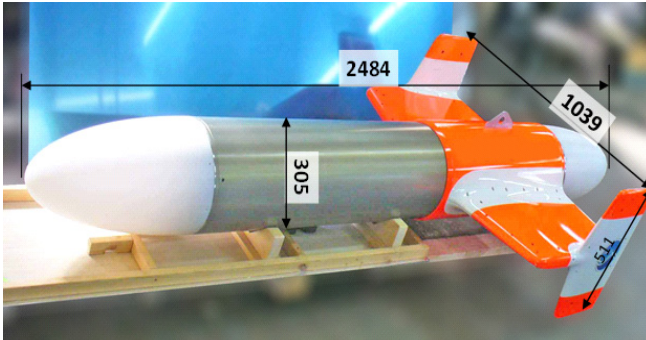


Fig. 2 Photo of the glider unit: mm

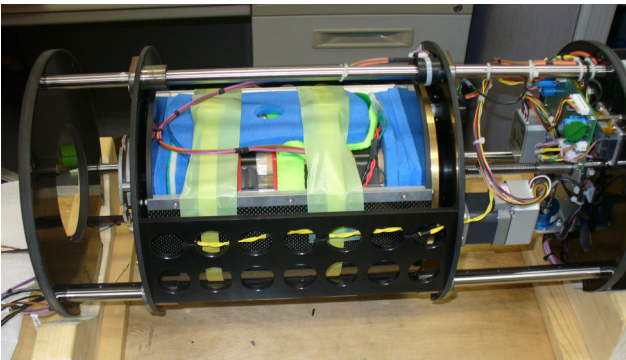


Fig.3 Photo of the Gravity Center Controller

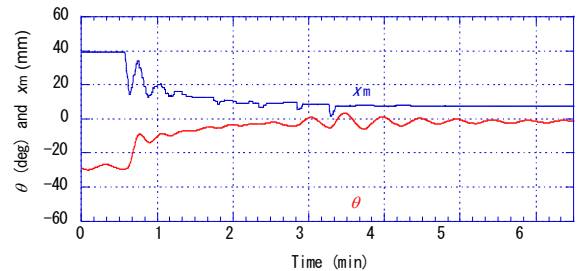
とにより、重心を横方向に移動し、グライダーを旋回させることもできる。重心移動装置の主要目を Table 1 に示す。

電池の移動にはパルスモータ (CM1 マッスル社) を用いた。ドライバへの制御信号は、シリアル通信で送っている。重りの移動量はリニアポテンショメータで測定している。サンプリング間隔は 0.2 秒とした。

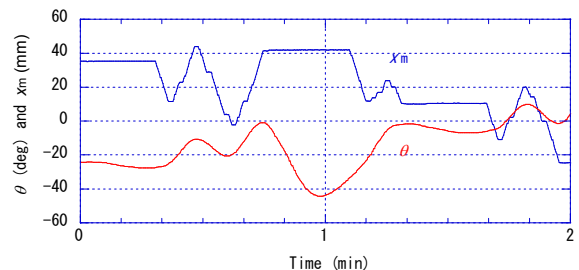
制御器への入力はピッチ角 θ で、出力は重心移動装置の縦方向位置 x_m である。PID 制御の計算間隔も、サンプリング間隔に合わせている。制御方法を簡単化するために、移動指令に対する完了応答を受けてから、次の移動指令を送るようにしている。また、チャタリングを防ぐため、重りの現在位置と目標位置の差が一定値以下の場合には、移動指令を送らない。ピッチ角の現在値と目標値の差が一定の値以下になったときに、制御を一旦停止する。一定時間経過後、ピッチ角と目標値の差が一定の値以下の場合には、制御を終了する。差が大きくなった場合には、制御を再開する。なお、滑走実験では実験途中で制御が終了しないように、この一定値を 0 とした。

Table 1 Specifications of the Gravity Center Controller

Item	Value
Weight of the moving parts	15.91 kg
Longitudinal velocity	7.5 mm/s
Lateral angular velocity	7.2 deg/s
Longitudinal moving stroke (software limited)	135mm
Lateral rotation stroke (software limited)	± 70 deg



(a) P-gain = 0.8, I-gain = 0.03, D-gain = 5



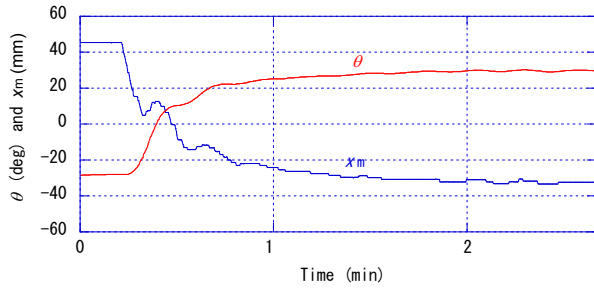
(b) P-gain = 0.8, I-gain = 0.03, D-gain = 10

Fig.4 Pitch control of the underwater glider being hanged with a thin string: Comparison of D-gain

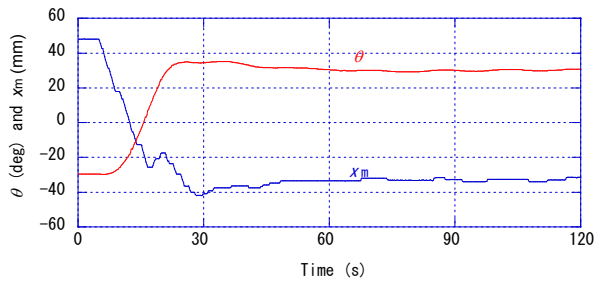
3 吊り下げた状態でのピッチ角制御実験

滑走状態でのピッチ角制御実験に先立ち、グライダーを線径 1.9mm のケブラーロープで吊り下げた状態でピッチ角制御を行い、安定した制御が行える PID の制御係数を求めた。ロープの固定点は、グライダーの浮力中心の上とした。グライダーの水中重量は 0.2 kg に設定した。

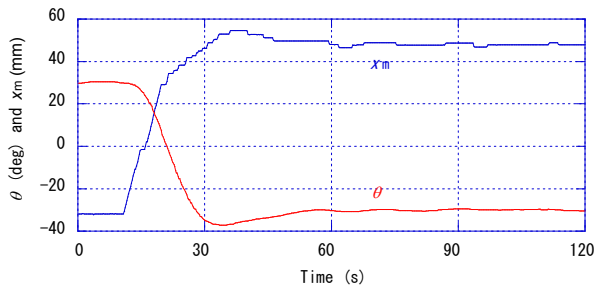
実験ではまず微分ゲインを変えて、安定な範囲を求めた。なお、実験に先立ってピッチ制御のシミュレーションを行な



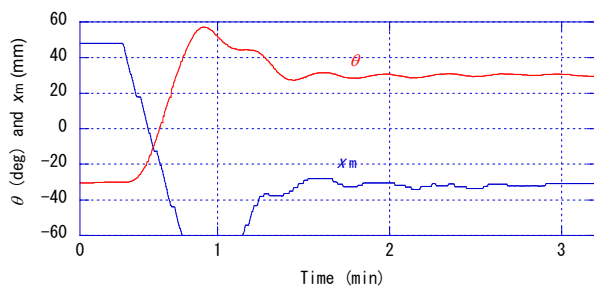
(a) P-gain = 0.4, I-gain = 0.06, D-gain = 5



(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5



(c) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5



(d) P-gain = 0.4, I-gain = 0.24, D-gain = 5

Fig.5 Pitch Control of hunged glider: Comparison of I-gain

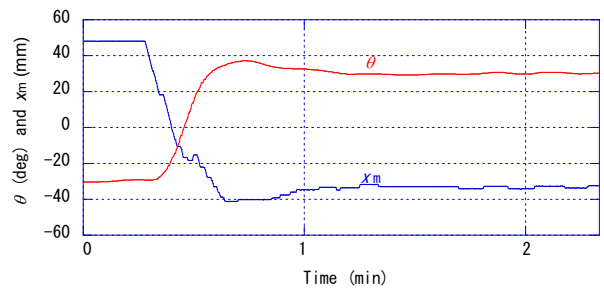
い、実験で使う制御係数の範囲を絞り込んでいる。

Fig. 4 に微分ゲインを 5 とした場合と、10 とした場合のピッチ角の制御実験結果を示す。ピッチ角の目標値は 0 deg であり、比例ゲインと積分ゲインはそれぞれ 0.8 と 0.03 である。微分ゲインが 5 の場合 (Fig. 4(a)) はピッチ角が目標値に収束しているのに対し、微分ゲインを 10 とした場合 (Fig. 4(b)) は発散している。この実験結果から、以後の実験では微分ゲインを 5 として行った。なお、Fig. 4(b) で重心移動装置の動きが一旦停止しているのは、ピッチ角の現在地と目標値の差が一定の値以下になったためである。

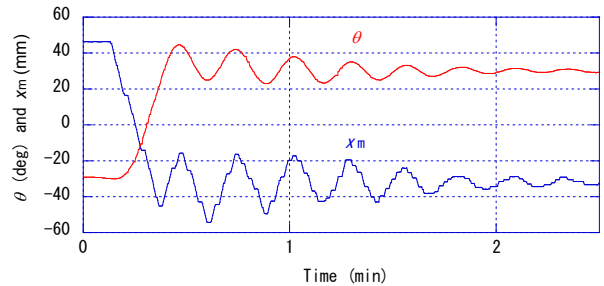
次に積分ゲインと比例ゲインを変えて、多くの測定を行った。その結果、比例ゲイン 0.4, 積分ゲイン 0.12 の場合が最もスムーズに目標値に収束していることが確認された。Fig. 5 に比例ゲイン 0.4, 積分ゲイン 0.12 を中心に積分ゲインを変えた場合の実験結果を示す。ピッチ角目標値は、(a), (b), (d) では 30 deg, (c) では -30 deg である。(b) と (c) は目標値の符号が異なるだけで、他の条件は同一である。若干のオーバーシュートがあるものの、目標値にスムーズに収束していることが確認できる。また、制御方向の違いによる差は見られない。積分ゲインを 1/2 にした場合 (a) では、オーバーシュートはみられないものの、収束にかかる時間が長くなっている。積分ゲインを 2 倍にした場合 (d) には、収束に要する時間はあまり変わらないものの、オーバーシュートが大きくなっている。

比例ゲインを変えた場合の結果を Fig. 6 に示す。比例ゲインを 1/2 に場合 (a) では、収束に要する時間が長くなっている。比例ゲインを 2 倍にした場合には、振動しながら収束している。

これらの実験結果から、吊り下げた状態では比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインをそれぞれ 0.4, 0.12, 5 とした場合が最もスムーズに目標値に収束していることが、確認できる。



(a) P-gain = 0.2, I-gain = 0.12, D-gain = 5



(b) P-gain = 0.8, I-gain = 0.12, D-gain = 10

Fig.6 Pitch Control of hunged glider: Comparison of P-gain

4 ピッチ角制御の滑走実験

滑走状態でのピッチ角制御実験も前述の深海機器力学実験水槽で行った。水槽の大きさの制限があるため、滑走途中からピッチ角制御を開始したり、ゲインを変えたりすることができない。そこで、まずテグスで吊り下げた状態でピッチ角制御を行い、姿勢が安定したところで、テグスを緩めて滑走を開始した。Fig. 7 はテグスで吊り下げた状態を示したものの

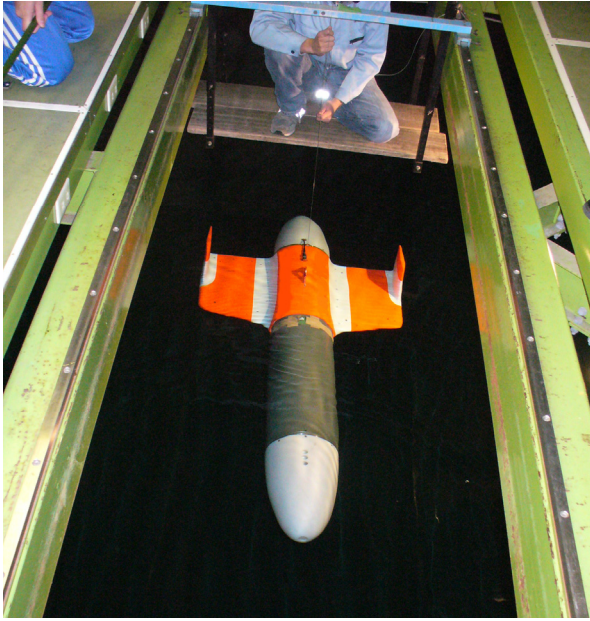
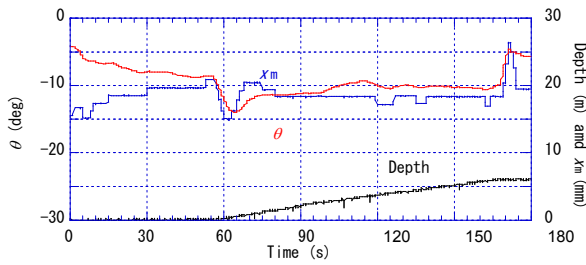
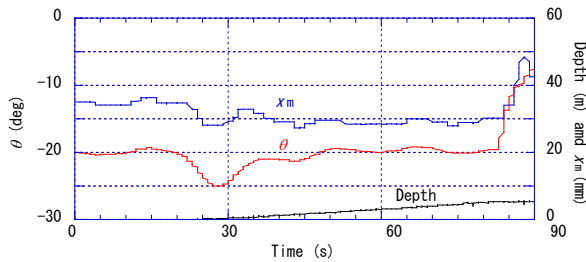


Fig.7 Photo of the glider hanged with a nylon string



(a) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5,
Weight in water = 0.485 kg



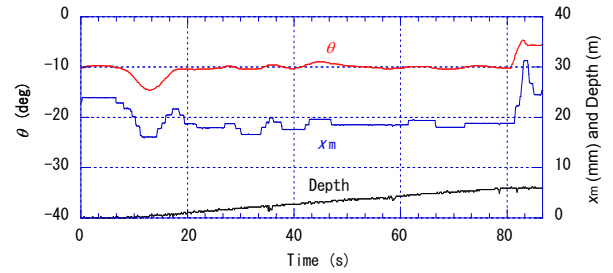
(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5
Weight in water = 0.485 kg

Fig.8 Pitch Control while gliding

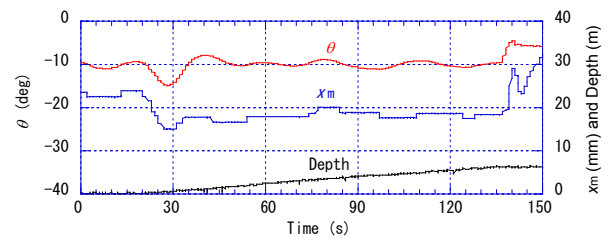
である。

滑走状態でのピッチ角制御実験では、前章で求めた制御ゲイン（比例ゲイン：0.4，積分ゲイン：0.12，微分ゲイン：5）を中心に滑走させ、その制御性能を評価した。まず、水中重量を 0.485 kg とした場合の測定例を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。Fig. 8 では比例ゲイン：0.4，積分ゲイン：0.12，微分ゲイン：5 とし、目標ピッチ角をそれぞれ -10 deg, -20 deg として滑走させた。テグスで吊り下げた状態で、ピッチ角制御が始まっており、ほぼ目標値に収束している。テグスを緩めた瞬間にピッチ角は一旦頭下がりになる。その後、滑走を開始しながらピッチ角も目標値に向けて制御される。図(a)と(b)では目標ピッチ角が異なるが、いずれもスムーズに目標値に収束している。深度が 7m に達したところで水槽の底に着底し、実験が終了している。

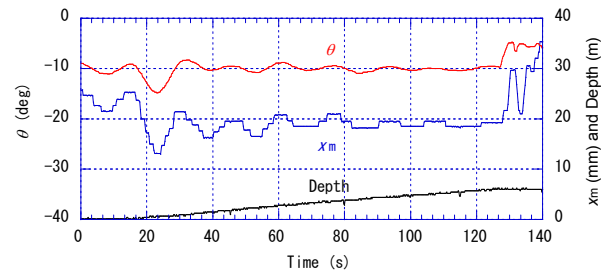
Fig. 9 は積分ゲインと比例ゲインを変えて滑走させた場合のピッチ角制御状態を示したものである。(a) は比例ゲインを 2 倍、(b)は積分ゲインを 2 倍、(c) は比例と積分ゲインを共に 2 倍にしたものである。いずれも目標ピッチ角に収束しているが、やや振動しながら収束している。



(a) P-gain = 0.8 I-gain = 0.12, D-gain = 5
Weight in water = 0.485 kg



(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.24, D-gain = 5
Weight in water = 0.485 kg

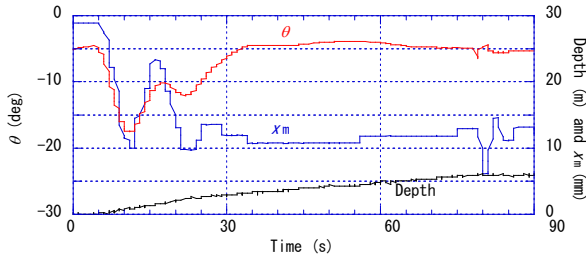


(c) P-gain = 0.8, I-gain = 0.24, D-gain = 5
Weight in water = 0.485 kg

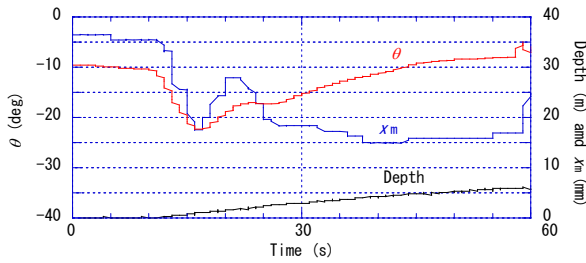
Fig.9 Pitch Control while gliding

次に水中重量を 1.47 kg とした場合の実験結果を Fig. 10 から Fig.12 に示す。Fig. 10(a) と(b)の目標ピッチ角はそれぞれ -5 deg と -10 deg である。(b)ではピッチ角が目標ピッチ角に収束する前に着底して実験が終了している。いずれも目標値にスムーズに収束していることが確認できる。

Fig. 11 (a) と(b) は目標ピッチ角を -10 deg とし、比例ゲイ

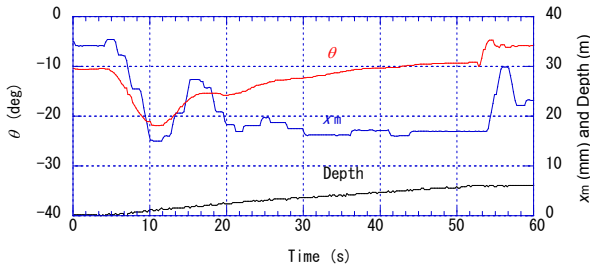


(a) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5,
Weight in water = 1.74 kg

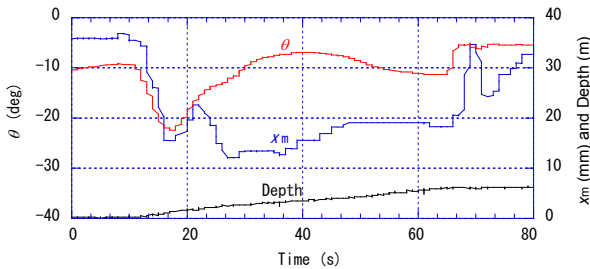


(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.12, D-gain = 5
Weight in water = 1.74 kg

Fig.10 Pitch Control while gliding



(a) P-gain = 0.8, I-gain = 0.12, D-gain = 5,
Weight in water = 1.74 kg



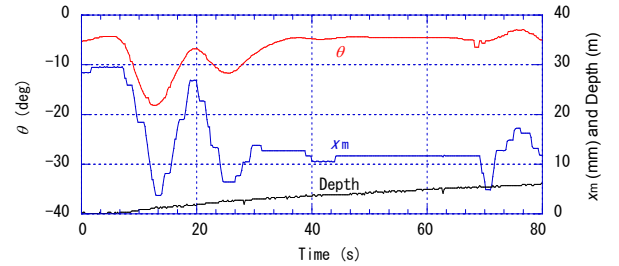
(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.24, D-gain = 5
Weight in water = 1.74 kg

Fig.11 Pitch Control while gliding

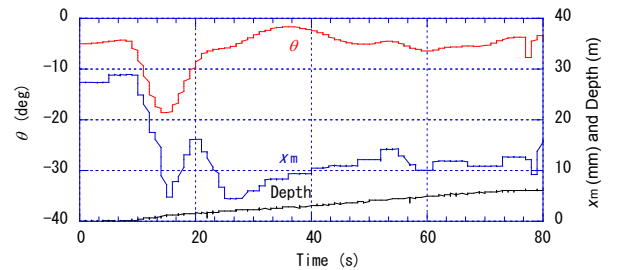
ンと積分ゲインをそれぞれ 2 倍にして滑走させたものである。(a)ではオーバーシュートもみられず、Fig. 10 (b) と比べて目標値への収束時間も短くなっている。吊り下げた状態でのピッチ角制御とは、最適な制御ゲインが若干異なるようである。(b)では目標ピッチ角に収束しているものの、オーバーシュートがみられる。

次に目標ピッチ角を -5 deg とした滑走例を Fig. 12 に示す。(a) では比例ゲインを 2 倍、(b)では積分ゲインを 2 倍、(c) では比例と積分ゲインをともに 2 倍にしている。(a) では Fig. 11 (a) と同様に、オーバーシュートもみられず、Fig. 10 (b) と比べて目標値への収束時間も短くなっている。(b) では Fig. 11 (b) と同様に、目標ピッチ角に収束しているものの、オーバーシュートがみられる。(c) は振動気味に収束している。

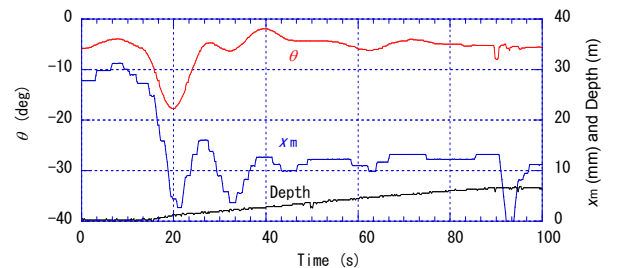
これらの実験結果から、水中重量が 1.74 kg の場合にも、比例ゲイン : 0.4, 積分ゲイン : 0.12 の場合はスムーズに目標値に収束することが確認できる。いずれの場合にもゲインを 2 倍にしても発振状態には至らず、ロバストなピッチ角制御が実現したと考えられる。



(a) P-gain = 0.8 I-gain = 0.12, D-gain = 5
Weight in water = 1.74kg



(b) P-gain = 0.4, I-gain = 0.24, D-gain = 5
Weight in water = 1.74 kg



(c) P-gain = 0.8, I-gain = 0.24, D-gain = 5
Weight in water = 1.74 kg

Fig.12 Pitch Control while gliding

5 結語

深海機器力学実験水槽を用いて、開発中の長期定域観測用水中グライダーのピッチ角制御実験を行い、PID 制御の制御ゲインを決定した。水槽の大きさの制限で、浅いピッチ角の実験しかできなかったが、ロバストなピッチ角制御が可能であることが確認できた。

実験ではまず細径ロープで吊り下げた状態でピッチ角制御を行い、最適なゲインを求めた。つぎにこのゲインを中心に滑走状態でのピッチ角制御を行い、その制御性能を評価した。その結果、吊り下げ状態で求めた制御ゲインが、滑走状態でもそのまま利用可能であることが確認できた。また、滑走状態のほうが、安定なゲインの幅が広がるようであった。

本実験で得られたデータは、シミュレーションとの比較も行い、良く一致することが確認されている¹¹⁾。今後、海洋実験でより深いピッチ角での制御実験を行う予定である。また、水槽で実施が困難な旋回実験も、海洋実験で行う予定である。また現在着底機能やスリープ機能の開発も進めている。これらの結果は、別途報告する予定である。

謝辞

実験に協力を頂いた九州大学応用力学研究所の稲田勝氏、野田穰士朗氏、(株)マリン・ワーク・ジャパンの杉山智彦氏、九州大学大学院総合理工学部大学院生の塩飽氏、松岡氏、西森氏、松元氏に深謝いたします。

本研究は JSPS 科研費 24246146 の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) D. Roemmich, G. C. Johnson, S. Riser, R. Davis, J. Gilson, W. B. Owens, S. L. Garzoli, C. Schmid and M. Ignaszewski: The Argo Program : Observing the Global Ocean with Profiling Floats, Oceanography, Vol.22, pp.34-43, 2009.
- 2) T. Matsumoto, K. Ando, Y. Ishihara and Y. Takahashi: Improvements of ocean and atmospheric measurements on the TRITON buoy, Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBETECHNO-OCEAN '08, 2008.
- 3) K. Ando, M. Naguea and T. Hasegawa : Analysis of tropical climate variability based on the TAO/TRITON observation: Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBETECHNO-OCEAN '08, 2008.
- 4) D. L. Rudnick, C. C. Eriksen, D. M. Fratantoni and M. J. Perry : Underwater Gliders for Ocean Research, Marine Technology Society J., vol. 38, no. 2, pp. 73-84, 2004.
- 5) K. Asakawa, M. Nakamura, T. Kobayashi, Y. Watanabe, T. Hyakudome, Y. Ito and J. Kojima: Design Concept of Tsukuyomi – Underwater Glider Prototype for Virtual Mooring –, in Proc. of OCEANS'11 Santander, 2011.
- 6) 浅川賢一, 百留忠洋, 渡辺佳孝, 小林大洋, 中野善之, 中村昌彦, 伊藤謙, 小島淳一: 定域長期観測用シャトルビークル「ツクヨミ」の概要, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 14 号, pp.479-482, 2012.
- 7) Asakawa, K., Kobayashi, T., Nakamura, M., Watanabe, Y., Hyakudome, T., Ito, Y., and Kojima, J (2012). " Results of the First Sea-test of Tsukuyomi; a Prototype of Underwater Gliders for Virtual Mooring" in Proc. of OCEANS'12 Hampton Roads.
- 8) Masahiko Nakamura, Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Satoru Kishima, Hiroki Matsuoka and Takuya Minami, "Hydrostatic Coefficients and Motion Simulations of Shuttle Vehicle for Virtual Mooring," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.38, No.3, pp.581-597, 2013.
- 9) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋, 松岡宏樹, 川谷哲也, 植田剛史: シャトルビークル「ツクヨミ」の水槽滑空試験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号, pp.483-486, 2012.
- 10) 中村昌彦, 浅川賢一, 百留忠洋, 川谷哲也: バーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発ー水槽滑空試験ー, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 印刷中
- 11) 中村昌彦, 浅川賢一, 渡健介, 百留忠洋: シャトル型水中ビークル「ツクヨミ」の滑空角制御シミュレーションと外乱抑制性能, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会第 24 回海洋工学シンポジウム, OES24-006, 2015.